Die Fehlererkennbarkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung von Stahl mit energiereichen Röntgenstrahlen.

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Julius - Maximilians - Universität
zu Würzburg

Vorgelegt von:
Diplom-Physiker Rudolf Schittenhelm
aus Erlangen.

Erlangen 1956

Eingereicht am: 25. März 1956

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Mai 1956

Berichterstatter: Professor Dr. H. Kulenkampff

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Erlangen, den 4. 4. 1956

Die Fehlererkennbarkeit bei der zerstörungsfreien Prüfung von Stahl mit energiereichen Röntgenstrahlen.

Energiereiche Röntgenstrahlung wird ihrer großen Durchdringungsfähigkeit wegen mit Vorteil zur Durchstrahlung von Stahlprüflingen über 100 mm Dicke verwendet. Dabei ist zunächst zu befürchten, daß die Erkennbarkeit von Fehlern geringer als bei klassischer Röntgenstrahlung ist, weil die für den Fehlernachweis benutzte Differenz in der Primärstrahlenintensität dem Absorptionskoeffizienten direkt proportional ist und daher bei energiereicher Strahlung relativ klein bleibt. Experimente 1),2),3),4) haben jedoch gezeigt, daß diese Befürchtung nur bei sehr kleinen Prüflingdicken zutrifft, während in dem für die energiereiche Strahlung vorgesehenen Dickenbereich die Detailerkennbarkeit sogar erheblich besser als bei der klassischen Röntgenstrahlung ist. Dieses Ergebnis ist, wie die folgenden Ausführungen zeigen, darauf zurückzuführen, daß mit zunehmender Prüflingdicke die Fehlererkennbarkeit bei energiereicher Strahlung wesentlich weniger als bei klassischer durch nicht abbildend wirkende Streustrahlung vermindert wird.

In der vorliegenden Arbeit wird der von Inhomogenitäten im Prüfling auf dem für den Fehlernachweis benutzten Film erzeugte Kontrast in Abhängigkeit von der Prüflingdicke und der Strahlenenergie (einheitliche Energie und Betatronbremsspektren) rechnerisch ermittelt. Der Zusammenhang mit der praktisch interessierenden Fehlererkennbarkeit wird geschaffen, indem bei einer bestimmten Strahlenenergie und Prüf-

lingdicke der errechnete Kontrast der experimentell bestimmten Fehlererkennbarkeit zugeordnet wird. Aus der Dicken- und Energieabhängigkeit des errechneten Kontrastes läßt sich dann die Fehlerkennbarkeit für beliebige Primärenergien und Prüflingdicken angeben.

1.) Die vom Fehler erzeugte Differenz in der Strahlenwirkung.

Zu ihrer Bestimmung wird zunächst die von einem Fehler erzeugte Differenz in der Strahlenintensität ΔJ im geometrischen Schatten des Fehlers ermittelt und auf die Gesamtintensität J am Prüflingsende, welche aus der Primärintensität J_p und der Streuintensität J_s besteht, bezogen. Wie J setzt sich auch ΔJ aus der Intensitätsdifferenz in der Primärstrahlung ΔJ_p und der Differenz in der Streustrahlenintensität ΔJ_s zusammen, wobei ΔJ_s dadurch entsteht, daß ein als Dickenauftrag gedachter Fehler einerseits Streustrahlung absorbiert, andererseits aber zusätzlich Streustrahlung erzeugt. Je nach Prüflingdicke und Lage des Fehlers im Prüfling kann ΔJ_s der Primärintensitätsdifferenz ΔJ_p gleich oder entgegengerichtet sein. Wegen der Divergenz der Streustrahlung ist ΔJ_s im geometrischen Schatten des Fehlers umso geringer, je weiter der Fehler vom Film entfernt, je kleiner der Fehler, und je größer der Öffnungswinkel der Streustrahlung, d.h. je niedriger die Primärenergie ist. Da die Verminderung der Streustrahlenintensität durch Absorption im Fehler weitgehend durch die vom Fehler zusätzlich erzeugte Streustrahlung wieder kompensiert wird, ist ΔJ_s stets klein im Verhältnis zu ΔJ_p und kann, wie auch aus Experimenten hervorgeht, praktisch vernachlässigt werden.

Die Schwärzung des Films kommt jedoch nicht durch die Strahlenintensität unmittelbar, sondern praktisch ausschließlich durch die Ionisation der bei der Absorption ausgelösten Sekundärelektronen und

Positronen zustande. Die Strahlenwirkung ist daher außer von der Strahlenintensität noch von der Strahlenenergie und dem Absorbermaterial abhängig. Um bei gegebener Energie und Intensität möglichst hohe Strahlenwirkung zu erhalten, wird der Film zwischen Schwermetallfolien (Blei) eingebettet, deren Dicke der Reichweite der Sekundärelektronen angepaßt ist. Die Strahlenwirkung im Film wird bei hohen Energien praktisch gleich der Wirkung in den Folien, weil Dicke und Dichte beim Film wesentlich geringer als bei den Folien sind. Der Absolutwert der Strahlenwirkung W ist bei gegebener Energie und Intensität der Röntgenstrahlung nur abschätzungsweise bestimmbar. Für die Auswertung der Rechenergebnisse genügt jedoch die Kenntnis des relativen Verlaufs von W in Abhängigkeit von Strahlenenergie und Prüflingdicke, da der Zusammenhang mit der Fehlererkennbarkeit ohnehin über eine experimentell zu ermittelnde Größe geschaffen werden muß. Bei gleichbleibendem Absorbermaterial läßt sich der relative Verlauf der Wirkung W in guter Näherung berechnen, indem man die am Meßort vorhandene Strahlenintensität J (E) mit einem energieabhängigen Faktor G (E) multipliziert, der angibt, welcher Bruchteil der in den Bleifolien absorbierten Röntgenstrahlenintensität in ("wirksame") Elektronenintensität umgesetzt wird. Das dabei aus dem Intensitätsverhältnis $\Delta J/J$ entstehende Wirkungsverhältnis $\Delta W/W$ ist dem Kontrast proportional.

Ist die Strahlenintensität am Meßort nicht monochromatisch, trägt jede Intensität der Energie E entsprechend ihrer Wirkung G (E) zur Gesamtstrahlenwirkung bei. Zur genaueren Bestimmung des relativen Kontrastes ist daher, selbst bei einheitlicher Primärenergie, die Kenntnis der spektralen Verteilung der Streustrahlung erforderlich, die sich außer mit Primärenergie und Absorbermaterial auch noch mit der Absorberdicke verändert.

2.) Bestimmung des Streustrahlenspektrums 1.Ordnung.

Die aus der Primärstrahlung entstehende Streustrahlung 1.Ordnung wird auf dem Wege zum Prüflingende ebenfalls absorbiert und erzeugt Streustrahlung 2.Ordnung, welche wiederum Streustrahlung 3.Ordnung bildet u.s.w. Die gesamte Streustrahlenintensität setzt sich additiv aus der Streustrahlung verschiedener Ordnungen zusammen. Das Spektrum der Streustrahlung 1.Ordnung läßt sich bei einheitlicher Primärenergie mit noch tragbarem Aufwand an Rechnung exakt ermitteln. Bei der Streustrahlung 2.Ordnung, welche aus dem dickenabhängigen Spektrum der Streustrahlung 1.Ordnung entsteht, erfordert die exakte Bestimmung des Spektrums übermäßig großen Rechenaufwand. In die Rechnung wurden daher die Streustrahlung 2. und 3. Ordnung nur auf den Spektrumschwerpunkt bezogen berücksichtigt, Streustrahlung noch höherer Ordnung wurde vernachlässigt.

Die in jedem Schichtelement bei der Absorption der Primärstrahlung durch Photo-Compton- und Paarbildungsprozesse erzeugte Streustrahlung 1. Ordnung setzt sich aus 3 Anteilen zusammen:

a) der Compton-Streustrahlung,

b) der Bremsstrahlung aus den Sekundärelektronen und Positronen,

c) der Vernichtungsstrahlung der Positronen.

Ihre spektrale Verteilung ist nur von Primärenergie und Absorbermaterial abhängig, wenn man annimmt, daß die Bremsstrahlung direkt am Entstehungsort der Elektronen und Positronen erzeugt wird.

Die spektrale Verteilung der Compton-Streustrahlung läßt sich durch Substitution des Streuwinkels durch die Energie des gestreuten Quants in der von Klein - Nishina angegebenen Intensitätsverteilung 5) ermitteln.

Zur Berechnung des Bremsspektrums ist die Kenntnis des Sekundärelektronenspektrums erforderlich. Da sich Positronen hinsichtlich Ionisation und Bremsstrahlungserzeugung nahezu wie Elektronen verhalten, können sie in das Elektronenspektrum miteinbezogen werden.

Die Photelektronen haben praktisch alle die volle Energie der Primärstrahlung. Die Energieverteilung der Comptonelektronen ermittelt man ebenfalls aus der Klein - Nishina-Formel durch entsprechende Substitution. Das Elektronen- und Positronenspektrum bei der Paarbildung kann man den von Heitler 5) angegebenen Formeln entnehmen.

Entsprechend der Zusammensetzung des Absorptionskoeffizienten von Eisen aus Photo-Compton- und Paarbildungskoeffizient versieht man die 3 Elektronenspektren mit entsprechenden Gewichten und addiert sie. Das resultierende Elektronenspektrum wird in Energieintervalle zerlegt und für jedes Intervall mit energieabhängigem Wirkungsgrad der Bremsstrahlungserzeugung die spektrale Verteilung der Bremsstrahlung einer dicken Eisenantikathode nach Kulenkampff 6) bestimmt. Das gesamte Spektrum der Bremsstreustrahlung ergibt sich durch Summation über alle Intervalle.

Der Anteil der Vernichtungsstrahlen der Positronen an der Gesamtstreustrahlung ist vernachlässigbar.

Das Streustrahlenspektrum 1. Ordnung erhält man daher, indem man das Comptonspektrum und Bremsspektrum mit entsprechenden Gewichten multipliziert und die beiden Streuanteile addiert. Bei Primärenergien unterhalb 1o MeV überwiegt die Comptonstreustrahlung, oberhalb 1o MeV die Bremsstreustrahlung.

Der Winkel ϑ, den die Streustrahlung mit der Primärstrahlung einschließt, ist oberhalb 1o MeV Primärenergie klein 7) und für die Rechnung vernachlässigbar. Unterhalb 1o MeV läßt er sich in guter Näherung aus

den für den Comptoneffekt gültigen Beziehungen bestimmen.

Die Diffusionsgleichung für eine beliebige Energie E^* des Streustrahlenspektrums läßt sich leicht aufstellen, da die Strahlung der Energie E^* in jedem Schichtelement einerseits in einem der Primärintensität proportionalem Maße erzeugt, andererseits aber mit entsprechendem Absorptionskoeffizienten $\mu(E^*)$ geschwächt wird. Der Winkel gegen die Primärstrahlung kann bei jeder Energie berücksichtigt werden. Aus der Lösung der Diffusionsgleichung ist bei gegebener Primärenergie die spektrale Verteilung der Streustrahlung für jede Schichtdicke des Absorbers bestimmbar. Aus ihr können die Spektrumschwerpunkte der Streustrahlung höherer Ordnung ermittelt werden.

3.) Relativer Kontrast und Fehlererkennbarkeit.

Die Kenntnis der spektralen Verteilung der Streustrahlung ermöglicht die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Streustrahlen- und Primärstrahlenwirkung W_s/W_p, welches als entscheidender Faktor in den relativen Kontrast $\Delta W/W$ eingeht. W_s/W_p ist für die Schichtdicke $D = 0$ ebenfalls 0 und steigt mit zunehmender Dicke monoton an. Die Steilheit des Anstiegs hängt jedoch sehr von der Strahlenenergie ab und ist bei Energien, welche dem Absorptionsminimum von Stahl entsprechen, wesentlich geringer als bei höheren und niedrigeren Energien. W_s/W_p läßt sich auf einfache Weise auch halbexperimentell ermitteln, indem man den Verlauf der Gesamtstrahlenwirkung mit zunehmender Schichtdicke mißt und davon jeweils die Wirkung der Primärstrahlung, deren Verlauf mit der Schichtdicke bei bekannter Primärenergie (oder Primärspektrum) ohne großen Aufwand und mit genügender Genauigkeit berechnet werden kann, abzieht. Für die vorliegenden Verhältnisse muß zur Messung der Strahlenwirkung die Meßkammer mit einem entsprechend dicken Bleimantel umgeben werden. Mit einem 15 MeV-Betatron der Siemens-Reiniger-Werke durchge-

führte Experimente zeigten für Primärspektren mit 16, 1o und 5 MeV Grenzenergie befriedigende Übereinstimmung mit der Rechnung.

Der von einem Fehler erzeugte relative Kontrast ist bei sehr kleinen Prüflingdicken (exakt für D = 0) dem Absorptionskoeffizienten für die Primärstrahlung direkt proportional, hat also bei Stahl ein Minimum zwischen 5 und 12 MeV entsprechend Betatronspektren 8),9),1o) mit 12 bis 3o MeV Grenzenergie. Dem geringeren Anstieg von W_s/W_p entsprechend nimmt der relative Kontrast bei Strahlungen dieses Energiebereichs jedoch wesentlich schwächer mit zunehmender Prüflingdicke ab als bei größeren und kleineren Energien. Das Kontrastminimum wird dadurch mit zunehmender Schichtdicke immer flacher und geht schließlich in ein Maximum über. Bei Prüflingdicken über 1oo mm (also in dem für Betatrongeräte vorgesehenen Dickenbereich) ist daher der relative Kontrast für Strahlenenergien im Bereich des Absorptionsminimums am größten. Bei gegebener Strahlenenergie vermindert sich der Kontrast - besonders bei großen Schichtdicken - schwächer als reziprok mit der Schichtdicke.

Als "Fehlererkennbarkeit" einer bestimmten Gattung von Fehlern (Lunker, Risse, Schlackeneinschlüsse usw.) bezeichnet man üblicherweise den kleinsten auf dem Film noch erkennbaren Fehler dieser Gattung. Um jedoch ein unabhängiges Maß für die Güte einer Durchstrahlungsaufnahme zu bekommen, wird jeweils auf der fokusnahen Seite des Prüflings eine Folge von Stahldrähten verschiedener Durchmesser angebracht und mitaufgenommen. Der Durchmesser des dünnsten auf dem Film noch erkennbaren Drahtes wird als Drahterkennbarkeit bezeichnet und ist - wie die Fehlererkennbarkeit - dem relativen Kontrast umgekehrt proportional. Der Zusammenhang zwischen relativem Kontrast und Drahterkennbarkeit kann daher hergestellt werden, indem man für eine bestimmte Strahlenenergie und Prüflingdicke die Drahterkennbarkeit bestimmt und dem entsprechenden rechnerisch ermittelten relativen Kon-

trast zuordnet. Als Vergleichswert wurde mit dem 15 MeV-Betatron bei 16 MeV Grenzenergie und 100 mm Prüflingdicke die Drahterkennbarkeit zu 0,067 cm bei Mikrotestfilm, und 0,062 cm bei Ilfort C-Film ermittelt. Diese Erkennbarkeit wurde unter normalen Aufnahmebedingungen gewonnen (Bleiverstärkerfolien 1,5 mm vor und 0,5 mm hinter dem Film, Filmschwärzung S = 2, Entwicklungsdauer 8 Minuten). Versuchsergebnisse zeigen aber, daß die Drahterkennbarkeit sehr von den Aufnahmebedingungen abhängig ist. Sie steigt beispielsweise mit zunehmender Filmschwärzung und bei Verwendung längerer Testdrähte, während bei Abweichungen von der optimalen Folienkombination Verringerung der Erkennbarkeit eintritt. Durch Vergrößerungsaufnahmen und Benutzung von Tantalverstärkerfolien läßt sich die Drahterkennbarkeit ebenfalls noch verbessern. Durch unterschiedliches Beobachtungsvermögen der Auswerter hervorgerufene Schwankungen in der Erkennbarkeit können nur durch Heranziehen geeigneter Auswerter vermieden werden. Auch dann stört jedoch noch die regelmäßige Testdrahtanordnung die objektive Auswertung sehr. Exaktere Versuchsergebnisse erhält man bei Verwendung von Bazillentesten 11).

Entsprechend dem Verlauf des relativen Kontrastes mit der Energie ist bei sehr kleinen Prüflingdicken die Drahterkennbarkeit im Energiebereich des Absorptionsminimums am schlechtesten. Sie verringert sich aber in diesem Energiebereich mit zunehmender Schichtdicke am wenigsten, sodaß sie oberhalb 100 mm Prüflingdicke schließlich besser als bei niedrigeren und höheren Energien ist. Bei gegebener Strahlenenergie vermindert sich die Drahterkennbarkeit weniger als reziprok mit der Prüflingdicke, sodaß die "relative Drahterkennbarkeit" (Quotient aus absoluter Drahterkennbarkeit von Prüflingdicke) mit zunehmender Dicke monoton besser wird.

Trotz der Abhängigkeit der Drahterkennbarkeit von verschiedenen Aufnahmebedingungen besteht zwischen Rechnung und Experimenten auch anderer Autoren 1),3),4) gute Übereinstimmung.

Literatur:

1.) H. Möller, W.Grimm, H. Weeber:
Arch.f.d.Eisenhüttenwesen 25(1954) 279

2.) R. Wideröe: VDI (1954) 15/16 S.45o

3.) H. Möller, W.Grimm, H. Weeber:
Arch.f.d.Eisenhüttenwesen 26(Okt.1955) 6o3

4.) R.Schittenhelm, I.Urlaub: ATM 24o (Jan.1956) 9

5.) W. Heitler: The Quantum Theory of Radiation (Oxford 1956)

6.) H. Kulenkampff: Überlegungen zur Bremsstrahlung schneller Elektronen (1942 unveröffentlicht)

7.) L.H. Lanzl u. A.O. Hanson: Phys.Rev. 83 (1951) 559

8.) J.D. Lawson: Nucleonics 1o (1952) 61

9.) L.I. Schiff: Phys.Rev. 7o (1946) 87

1o.) H. Kulenkampff, M.Scheer, R.Schittenhelm: Zeitschr.f.Physik 129 (1951) 2o2

11.) E.A.W. Müller: VDI 95 (1953) 1o93.

Herrn Prof. Kulenkampff danke ich für wertvolle Diskussionen und Hinweise, Herrn C. Clausnitzer für Hilfe bei der Durchführung der Rechnungen.